دانشکده مهندسی عمران
گروه مهندسی سازه

پایان‌نامه
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- سازه

عنوان

بررسی رفتار بادبندهای کابلی با صفحه فولادی وسط به عنوان سیستم جدید مهاربندی

استاد راهنما:
دکتر مجید برقیان

استاد مشاور:
دکتر یوسف حسین زاده

پژوهشگر:
آرش روشناس

شهریور ۹۳

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیر و تشکر

در ابتدا، خدای باری تعالی را سپاس که فرصت آموختن را از من دریغ ننمود.

همیشه و با تمام وجود، بر خود لازم می دانم که از دو عزیز زندگانی ام، پدر و مادرم تشکر ویژه ای داشته باشم که در مسیر رشد و بالندگی، همچون چراغی فروزان، روشنگر راه زندگانی ام بودند و در این راه از هیچ گذشتی، فروگذار نکردند.

نهایت سپاس و قدردانی خود را نسبت به استادگران قدر، جناب آقای دکتر برقیان ابراز می دارم چرا که با راهنمایی های دلسوزانه خود، به انجام رساندن این پایان نامه را سبب شده و هیچ گاه لطف بی انتهای خویش را از من دریغ نداشتند. همچنین از جناب آقای دکتر حسین زاده که مسئولیت مشاوره در این پایان نامه را داشته و با نظرات تعیین کننده خود، مرا راهنمایی نمودند، کمال تشکر را داشته و زحمات ایشان را ارج می نهم.

امید آن دارم که پژوهش حاضر، مورد قبول زحمت کشان راه علم و دانش باشد.

آرش روشناس

شهریور ۱۳۹۳

نام خانوادگی: روشناس **نام:** آرش

عنوان پایان‌نامه:

بررسی رفتار بادبندهای کابلی با صفحه فولادی وسط به عنوان سیستم جدید مهاربندی

استاد راهنما: دکتر مجید برقیان

استاد مشاور: دکتر یوسف حسین زاده

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی عمران **گرایش:** سازه **دانشگاه:** تبریز

دانشکده: مهندسی عمران **تاریخ فارغ‌التحصیلی:** ۱۳۹۳/۰۶ **تعداد صفحه:** ۱۱۰

کلیدواژه‌ها: قاب خمشی، مهاربند کابلی، مقاوم‌سازی لرزه‌ای، جابجایی نسبی

چکیده:

قاب خمشی یکی از سیستم‌های مقاوم در برابر نیروهای جانبی می‌باشد. این سیستم با شکل‌پذیری مناسب خود، توانایی جذب میزان زیادی انرژی را داراست. این سیستم به دلیل سختی جانبی ناکافی، در برابر زلزله تغییر شکل‌های بزرگی را تجربه می‌کند که بدین صورت امکان وارد آمدن خسارت به قسمت‌های غیر سازه‌ای در آن وجود خواهد داشت. برای جبران این نقیصه می‌توان مقاوم‌سازی قاب خمشی را انجام داد. مقاوم‌سازی قاب‌های خمشی فولادی در مواردی مانند تغییر کاربری سازه، نادرست بودن فرض‌های اولیه محاسباتی، خطاهای به وجود آمده در حین فرآیند ساخت و تغییر ملزومات لرزه‌ای آیین‌نامه‌های جدید، ضرورت پیدا می‌کند. مقاوم‌سازی این سیستم به شیوه‌های مختلفی قابل انجام است. در این پژوهش، رفتار قاب خمشی فولادی مقاوم‌سازی شده با مهاربند کابلی ضربدری به همراه صفحه فولادی مستطیل شکل در وسط کابل‌ها بررسی شده و با رفتار قاب خمشی مقاوم‌سازی شده با مهاربند کابلی ضربدری مقایسه گردیده است. با حصول اطمینان از صحت مدل‌های اجزا محدود، سه نمونه مدل اجزا محدود شامل قاب خمشی، قاب خمشی با مهاربند کابلی ضربدری و قاب خمشی با مهاربند کابلی ضربدری تقویت شده با صفحه فولادی میانی، تهیه و پاسخ‌های سازه از جمله نیروی محوری و لنگر ستون‌ها و تیرهای قاب و نیروی محوری وارد بر کابل‌ها بررسی و همچنین تنش وارد شده بر صفحه نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از سیستم مهاربند کابلی همراه با صفحه فولادی، تا حد زیادی سبب بهبود عملکرد سیستم شده و برای مقاوم‌سازی قاب‌های خمشی توصیه می‌گردد. در سیستم مهاربندی شده با کابل فولادی ضربدری و صفحه فولادی میانی، تغییر ضخامت صفحه چندان اقتصادی نیست اما ترکیب تغییرات قطر کابل با ابعاد مختلف صفحه، موجب مناسب‌تر شدن رفتار سازه تحت بارهای وارد بر آن می‌گردد. با استفاده از مهاربندهای کابلی در قاب خمشی، می‌توان جابجایی را کاهش داد. همچنین اضافه نمودن صفحه فولادی به وسط مهاربندها، جابجایی را افزایش داده و شکل‌پذیری قاب را نسبت به مهاربندهای کابلی ضربدری بهبود می‌بخشد. با تغییر ابعاد و ضخامت صفحه میانی و تغییر قطر کابل‌ها می‌توان جابجایی سازه را به جابجایی قاب خمشی یا جابجایی قاب با مهاربندهای کابلی ضربدری نزدیک نمود. با استفاده از مهاربندهای کابلی، نیروی محوری تیرهای طبقات چندین برابر می‌شوند اما

ادامه چکیده

بهره‌گیری از صفحه فولادی، تغییر چندانی در این نیروها ایجاد نمی‌نماید. استفاده از مهاربندهای کابلی ضربدری در قاب، موجب کاهش لنگر وارده شده و صفحات فولادی در میان مهاربندها نیز این لنگر را کاهش می‌دهد.

نیروی محوری وارد شده به ستون‌های قاب خمشی، کمترین میزان را در بین مدل‌های بررسی شده نشان داده ولی استفاده از مهاربندهای ضربدری، موجب افزایش قابل توجه این نیرو می‌شود. بهره‌گیری از مهاربندهای فولادی تقویت شده با صفحات فولادی، نیروی وارد شده را کاهش می‌دهند که از مزیت‌های این سیستم مهاربندی محسوب می‌شود.

فهرست مطالب

فصل اول: پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش ۱
۱ کابل فولادی ۲

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۱-۱ ساختمان کابل فولادی ۲
۱-۱-۲ رشته‌های مفتولی (Strand) ۶
۱-۱-۳ انواع بافت کابل رشته‌ای ۱۰
۱-۱-۴ کابل و مصالح ساخت آن ۱۲
۱-۱-۵ مفتول‌های مقاوم در برابر خوردگی ۱۳
۱-۱-۶ منحنی تنش کرنش کابل ۱۳
۱-۱-۷ اندازه‌گیری قطر کابل ۱۵
۱-۱-۸ مقاومت گسیختگی مفتول‌ها ۱۶
۱-۱-۹ خصوصیات رفتاری کابل‌ها ۱۶
۱-۱-۱۰ تدابیری برای انتهای کابل ۲۰
۱-۱-۱۱ انواع اتصالات در کابل‌های فولادی. ۲۰
۱-۱-۱۲ بازرسی کابل ۲۴
۱-۱-۱۳ مزایای سازه‌های کابلی ۲۵

۱-۲ سیستم‌های مقاوم جانبی ۲۵

۱-۲-۱ مقدمه ۲۵
۱-۲-۲ مقاوم‌سازی ۲۶
۱-۲-۳ انواع سازه های فولادی لرزه‌بر ۲۷
۱-۲-۴ روش‌های مقاوم سازی ۲۹

فصل دوم : مبانی و روش‌ها ۴۹

۲-۱ مبانی تئوری صفحات ۵۰

۲-۱-۱ کلیات ۵۰
۲-۱-۲ روابط حاکم بر تئوری صفحات ۵۰

۲-۲ تنش‌های موجود در عضو پوسته‌ای (صفحه‌ای) ۵۳

۲-۳ مشخصات مدل‌های سازه‌ای ۵۴
۲-۴ صحت‌سنجی مدل ساخته شده ۵۷

فصل سوم : بحث و نتایج ۵۸

۳-۱ بحث و نتایج ۵۹

۳-۱-۱ قاب ۱ طبقه ۶۲
۳-۱-۲ قاب ۳ طبقه ۷۲
۳-۱-۳ قاب ۶ طبقه ۷۹

۳-۲ نتیجه گیری ۹۰

فصل چهارم : پیوست ۹۳

۴-۱ پیوست ۹۴

منابع و مراجع ۱۰۶

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ عناصر سازنده کابل ۴
شکل ۱-۲ انواع سطح مقطع مفتول برای کابل‌های فولادی ۵
شکل ۱-۳ تغییرات دما در طول زمان در عملیات Patenting ۶
شکل ۱-۴ کابل با رشته ساده ۷
شکل ۱-۵ تاب در رشته‌های مفتولی ۸
شکل ۱-۶ رشته با تاب متقاطع ۸
شکل ۱-۷ رشته با تاب متقاطع ۹
شکل ۱-۸ رشته با تاب موازی ۱۰
شکل ۱-۹ انواع بافت کابل رشته‌ای ۱۱
شکل ۱-۱۰ رشته با تاب ترکیبی ۱۲
شکل ۱-۱۱ نمودار تنش کرنش کابل پیش‌تنیده ۱۴
شکل ۱-۱۲ ارزیابی مقاومت جاری شدن کابل مطابق استاندارد EN 10002-1 ..... ۱۵
شکل ۱-۱۳ نحوه اندازه‌گیری قطر کابل ۱۶
شکل ۱-۱۴ ارتباط بین نوع کابل با خستگی و فرسایش آن ۱۸
شکل ۱-۱۵ نحوه مقاومت در برابر پیچش کابل ۱۸
شکل ۱-۱۶ پارامترهای F، L و S0 ..... ۱۹
شکل ۱-۱۷ تدابیری برای انتهای کابل ۲۰
شکل ۱-۱۸ اسلینگ (حلقه انتهایی) ۲۱
شکل ۱-۱۹ گیس بافت کردن کابل با دست ۲۲
شکل ۱-۲۰ نحوه اجرای صحیح بست ۲۲
شکل ۱-۲۱ تعداد مورد نیاز بست برای قطرهای مختلف کابل ۲۳
شکل ۱-۲۲ انواع سوکت‌های کابل ۲۴
شکل ۱-۲۳ شکست مفتول فولادی ناشی از نیروی کششی زیاد ۲۴
شکل ۱-۲۴ شکست مفتول فولادی ناشی از خستگی ۲۴
شکل ۱-۲۵ شکست در کابل تحت کشش ناشی از خستگی ۲۵
شکل ۱-۲۶ شکست در کابل ناشی از سایش مفتول‌ها ۲۵
شکل ۱-۲۷ چرخه هیسترزیس قاب خمشی فولادی ۲۸
شکل ۱-۲۸ دیوار برشی فولادی ۳۱
شکل ۱-۲۹ انواع مختلف مهاربندی هم‌مرکز (همگرا) ۳۳
شکل ۱-۳۰ یک نوع مهاربندِ واگرای خاص ۳۴
شکل ۱-۳۱ نمونه‌های متداول مهاربندهای واگرا ۳۶

شکل ۱-۳۲ مهاربند ضد کمانش ۳۸
شکل ۱-۳۳ مقاطع عرضی BRB ۳۹
شکل ۱-۳۴ سازه با مهاربند کابلی یکپارچه در تحقیقات SPIDER..... ۴۲
شکل ۱-۳۵ شمای کلی سیستم با کابل یکپارچه ۴۲
شکل ۱-۳۶ سیستم مهاربندی با کابل یکپارچه با چندین جفت کابل ۴۳
شکل ۱-۳۷ مدل بررسی شده توسط هیروشی تاگاوا و زینگو هوو..... ۴۴
شکل ۱-۳۸ قاب سه طبقه در پژوهش‌های هیروشی تاگاوا و زینگو هوو ۴۵
شکل ۱-۳۹ قاب با مهاربند کابلی و میراگر مرکزی ۴۶
شکل ۱-۴۰ جزئیات میراگر مرکزی..... ۴۷
شکل ۲-۱ جزء کوچکی از صفحه، قبل و بعد از خمش ۵۱
شکل ۲-۲ سطوح مختلف صفحات برای تعریف تنش..... ۵۴
شکل ۲-۳ مدل‌های بررسی شده در این پژوهش (یک طبقه) ۵۵
شکل ۲-۴ رکورد زلزله NewZeland..... ۵۵
شکل ۲-۵ رکورد زلزله Tabas..... ۵۶
شکل ۲-۶ رکورد زلزله Northridge..... ۵۶
شکل ۲-۷ مدل بررسی شده در پژوهش مجید برقیان و مهدی نجفی ۵۷
شکل ۳-۱ تغییر شکل سازه تحت نیروهای جانبی ۵۹
شکل ۳-۲ کنتورهای تنش S11 در صفحه تحت زلزله طبس ۵۹
شکل ۳-۳ جابجایی گره سمت راست بام در قاب ۳ طبقه تحت زلزله Northridge..... ۶۰
شکل ۳-۴ تنش‌های وارد بر صفحه میانی در قاب ۱ طبقه تحت زلزله Tabas ۶۰
شکل ۳-۵ قاب سه طبقه و نحوه نام‌گذاری اعضای آن..... ۶۱
شکل ۳-۶ قاب یک طبقه و نحوه نام‌گذاری اعضای آن ۶۳
شکل ۳-۷ قاب ۶ طبقه و نحوه نام‌گذاری اعضای آن..... ۸۰

فهرست جداول

جدول ۱-۱ میله‌های فولادی بدون آلیاژ (EN 10016-2) ۳
جدول ۲-۱ ابعاد صفحه میانی ۵۵
جدول ۲-۲ مشخصات فولاد استفاده شده برای مدل‌سازی ۵۶
جدول ۲-۳ مشخصات کابل استفاده شده برای مدل‌سازی ۵۶
جدول ۲-۴ نتایج صحت‌سنجی و مقایسه مدل‌سازی‌های انجام شده ۵۷
جدول ۳-۱ حداکثر جابجایی گره سمت راست بام در قاب یک طبقه ۶۴
جدول ۳-۲ لنگر خمشی ستون ۱ ..... ۶۹
جدول ۳-۳ مقایسه میزان تنش‌های وارد بر صفحه در قاب یک طبقه ۷۰
جدول ۳-۴ لنگر خمشی وارد بر تیر در قاب سه طبقه ۷۴
جدول ۳-۵ نیروی محوری وارد بر کابل ۶ در قاب سه طبقه ۷۷
جدول ۳-۶ لنگر خمشی تیر طبقه دوم در قاب ۶ طبقه ۸۴
جدول ۳-۷ تنش وارد بر صفحه میانی واقع در طبقه ششم ۸۴
جدول ۳-۸ تنش وارد بر صفحه میانی در جهت S11 واقع در طبقه دومِ قاب ۶ طبقه ۸۵

فهرست نمودارها

نمودار ۳-۱ لنگر خمشی ایجاد شده در ستون سمت راست، طبقه دوم در قاب ۳ طبقه ۶۲
نمودار ۳-۲ نیروی محوری کابل طبقه آخر در قاب ۳ طبقه ۶۲
نمودار ۳-۳ نیروی محوری تیر در قاب یک طبقه ۶۴
نمودار ۳-۴ لنگر خمشی تیر در قاب یک طبقه..... ۶۶
نمودار ۳-۵ نیروی محوری کابل ۱ ..... ۶۷
نمودار ۳-۶ نیروی محوری ستون ۶۸
نمودار ۳-۷ نیروی محوری ستون ۲ ..... ۷۰
نمودار ۳-۸ تنش‌های وارد شده بر صفحه (S11) در قاب یک طبقه ۷۱
نمودار ۳-۹ تأثیر تغییر متغیرها بر زمان تناوب اصلی سازه..... ۷۲
نمودار ۳-۱۰ جابجایی نسبی گره سمت راست بام در قاب سه طبقه..... ۷۳
نمودار ۳-۱۱ نیروی محوری تیر طبقه سوم در قاب سه طبقه ۷۴
نمودار ۳-۱۲ نیروی محوری ستون ۱ در قاب سه طبقه ۷۵
نمودار ۳-۱۳ لنگر خمشی ستون ۱ در قاب سه طبقه ۷۶
نمودار ۳-۱۴ نیروی محوری ستون ۴ در قاب سه طبقه ۷۷
نمودار ۳-۱۵ تنش وارد بر صفحه وسط مهاربندهای طبقه سوم، در قاب سه طبقه..... ۷۸
نمودار ۳-۱۶ جابجایی نسبی گره سمت راست بام در قاب ۶ طبقه..... ۷۹
نمودار ۳-۱۷ لنگر خمشی تیر طبقه ششم در قاب ۶ طبقه ۸۲
نمودار ۳-۱۸ نیروی محوری تیر طبقه دوم در قاب ۶ طبقه..... ۸۳
نمودار ۳-۱۹ نیروی محوری ستون ۴ در قاب ۶ طبقه ۸۵
نمودار ۳-۲۰ لنگر خمشی ستون ۴ در قاب ۶ طبقه ۸۶
نمودار ۳-۲۱ نیروی محوری ستون ۱۲ در قاب ۶ طبقه ۸۷
نمودار ۳-۲۲ لنگر خمشی ستون ۱۲ در قاب ۶ طبقه ۸۸
نمودار ۳-۲۳ نیروی محوری کابل ۲۱ در قاب ۶ طبقه ۸۹

مقدمه

از دیرباز بلایای طبیعی همچون زلزله، یادآور ترس و وحشت و ویرانی و مرگ بوده که باعث توقف زندگی عادی و فعالیت‌های انسان‌ها شده است. هنوز هم زلزله یکی از عوامل مرگ و میر در کشورمان محسوب شده و تقریباً هر ده سال، زلزله‌ای سهمگین در اقصی نقاط ایران به وقوع می‌پیوندد که خسارت‌های مالی و جانبی فراوانی بر جای می‌گذارد. همواره ساخت ساختمان‌هایی که در برابر این نیروی خشمگین طبیعت ایستادگی کرده و از جان ساکنان سازه؛ گران‌بهاترین دارایی آنان محافظت کند، آرزوی دیرینه مهندسان بوده است. به دلایلی همچون اشتباهات ناخواسته محاسباتی، تغییر کاربری سازه، تغییر در الزامات لرزه‌ای آیین‌نامه‌های جدید و همین‌طور خطاهای حین فرایند ساخت، مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود؛ علاوه بر ساختن سازه‌های تازه سازِ مقاوم، ضرورت پیدا می‌کند.

افزایش سختی، شکل‌پذیری، مقاومت و جذب انرژی، از جمله مواردی هستند که برای مقاوم‌سازی باید مدنظر قرار گرفته و در کنار عواملی همچون هزینه‌های طراحی، مصالح، سهولت اجرای صحیح و کمترین دخالت در کاربری فعلی سازه؛ بر انتخاب نوع سیستم مقاوم‌سازی تأثیرگذار هستند.

یکی از سیستم‌های مقاوم در برابر نیروهای جانبی، قاب خمشی فولادی می‌باشد که بسیار هم مورد توجه عموم است. سیستم قاب خمشی فولادی، به دلیل شکل‌پذیری مناسب و امکان جذب زیاد انرژی زلزله، سیستم مطلوبی به شمار می‌آید. مشکل اصلی این سیستم در تغییر مکان جانبی زیاد یا نداشتن سختی جانبی کافی است. برای رفع این مشکل، ایده استفاده از سیستم‌های دوگانه ترکیبی به وجود آمد. این سیستم جدید، شامل قاب خمشی فولادی و یک سیستم مقاوم دیگر برای بر طرف کردن مشکل تغییر مکان جانبی قاب خمشی است. استفاده از مهاربند کابلی، یکی از روش‌های جدید و نوظهور برای مقاوم‌سازی قاب خمشی فولادی است. از مزایای مهاربند کابلی می‌توان به حذف احتمال کمانش موضعی مهاربند، نصب و اتصالات آسان کابل، مقاومت کششی بالا و امکان اعمال پیش‌تنیدگی و در نتیجه سختی جانبی بیشتر قاب، سبک بودن مهاربند کابلی و توجیه اقتصادی این نوع مهاربند نسبت به دیگر مهاربندها و همچنین عدم نگرانی نسبت به فشردگی مهاربند فشاری و در نتیجه، سبک‌تر شدن تیرها و ستون‌ها اشاره کرد.

در این پایان‌نامه؛ امکان استفاده از مهاربند کابلی واگرا و همگرا به همراه صفحه فولادی مستطیل شکل در وسط کابل‌ها بررسی شده و با رفتار لرزه‌ای مهاربند کابلی ضربدری مقایسه شده است. در ابتدا با نرم‌افزار SAP، بادبند کابلی با صفحه فولادی و همچنین بدون صفحه وسط بادبندها، مدل‌سازی شده و با تعیین مشخصات مقاطع و مصالح استفاده شده در مدل‌ها، به بررسی و مقایسه آن‌ها پرداخته شده است.

ساختار کلی پایان‌نامه

در فصل اول، به بررسی و مطالعه کابل‌های فولادی و آشنایی با این عضو سازه‌ای پرداخته شده است. در این فصل در مورد کابل و انواع آن، اجزای سازنده کابل و نیز خصوصیات رفتاری آن بحث شده است. در ادامه، بررسی خصوصیات قاب‌های خمشی فولادی مورد نظر بوده و مطالبی برای آشنایی با این سیستم آورده شده است. پس از آن، مطالبی برای مقاوم‌سازی قاب‌های خمشی فولادی و شیوه‌های نوین مقابله با نیروهای جانبی آورده شده است که سیستم مهاربندی کابلی یکی از عناوین این بخش محسوب می‌شود. پایان بخش فصل اول، مرور سوابق پژوهش‌های انجام یافته در رابطه با موضوع مقاوم‌سازی سازه‌ها و روش‌های آن، از جمله مهاربندهای کابلی می‌باشد.

در فصل دوم، به بررسی فرضیات استفاده شده برای تحلیل سازه پرداخته شده و مختصری در رابطه با تئوری‌ها و فرضیات مطرح در تئوری صفحات بحث شده است.

در فصل سوم، به بررسی و بحث در رابطه با نتایج بدست آمده از تحلیل پرداخته شده است. پس از بیان نتایج و یافته‌های تحقیق، پیشنهاداتی برای ادامه پژوهش‌های آتی آورده شده است.

فصل اول

پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش

کابل فولادی

۱-۱ مقدمه

هنگامی‌که آثار مختلف به جامانده از اقوام گذشته بررسی می‌گردد؛ آثاری دیده می‌شود که نشان از هوش و ذکاوت افرادی اندیشمند بوده است. بشر در گذشته، در موارد بسیاری برای غلبه بر نیازهای خود، استفاده از طناب را تجربه نموده است. از جمله موارد کاربرد طناب برای انسانِ باستان، انتقال ابزار و ادوات مورد نیاز خود از سطح زمین به ارتفاعات بالاتر به وسیله طناب یا در اصطلاح امروزی، کابل بوده است. از نمونه‌های قدیمی کابلِ ساخته شده، می‌توان به یک نمونه کابل کوتاه مسی یافت شده در خرابه‌های نینوا اشاره کرد که قدمت آن به حدود ۷۰۰ سال قبل از میلاد مسیح بازمی‌گردد. رومیان باستان نیز کابل‌هایی از سیم و ریسمان ساخته بودند که نمونه‌هایی از آن در موزه ناپل ایتالیا موجود است. این نمونه‌ها همگی مصداق این هستند که ویژگی‌های عنصر کابلی، برای بشرِ گذشته، آشنا و شناخته‌شده بوده است.

در دنیای امروزی، اولین کابل برای استفاده در صنایع، توسط مهندس آلمانی، ویلیام آلبرت (William Albert)، در سال ۱۸۳۱ میلادی به‌کار گرفته شده است[۱]. این کابل که قطری برابر ۱۸mm داشت، برای کار در معادن کوه‌های هارز (Harz) آلمان در Lower Saxony به عنوان کابل بالابرنده در یک غلاف قائم بکار می‌رفت و مورد استقبال کارگران و معدنچیان واقع شده بود. دلیل آن‌ها برای استقبال از اختراع آلبرت، سرویس‌دهی بهتر این کابل در مقایسه با زنجیر و یا طناب‌های کَنفی مرسوم، در برابر خرابی و کشش زیاد بود. نحوه ساخت کابل توسط آلبرت این‌گونه بود که سه عدد سیم ساخته شده از آهن با قطر یکسان با دست به دور یکدیگر پیچیده می‌شدند و یک رشته را تشکیل می‌دادند، سپس سه یا چهار رشته مشابه و یکسان با همان روش قبلی، با پیچیدن به دور یکدیگر، کابل را می‌ساختند. این کابلِ دست‌ساز که به کابل آلبرت مشهور بود، به علت داشتن مفتول-های نسبتاً بزرگ و سخت، انعطاف‌پذیری زیادی نداشت.

در انگلستان، آندرو اسمیت (Andrew Smith) نیز روش‌های مختلف به‌کارگیری کابل در بادبان کشتی‌ها را می‌آزماید و در سال ۱۸۴۰ میلادی همزمان با آغاز به کار سیستم ریلی در لندن، کابل ساخته شده توسط وی در این سیستم به کار می‌رود. چندی بعد در آمریکا نیز کابل توسط جان روبلینگ (John , A Roebling) در ساخت پل‌های معلق به کار می‌رود که پایه‌ای برای موفقیت‌های بعدی او در طراحی، مصالح مورد استفاده و شیوه‌های مختلف ساخت کابل می‌شود[۲] و [۳].

۱-۱-۱ ساختمان کابل فولادی

به طور کلی، کابل مجموعه‌ای از مفتول‌های فولادی است که به شیوه‌ای خاص به هم تابیده شده و بدنه‌ای واحد را می‌سازند. این مفتول‌های فولادی، کوچک‌ترین بخش کابل فولادی هستند[۱].

مفتول‌ها با یک الگوی خاص، حول یک مرکز در یک یا چند لایه قرار می‌گیرند و رشته‌ها را می‌سازند. رشته‌ها نیز به نوبه خود، حول یک هسته قرار گرفته و کابل فولادی را تشکیل می‌دهند.

در مقایسه با فولاد معمول در سازه‌ها، مقاومت کابل‌های فولادی بالاتر ولی شکل‌پذیری آن‌ها کمتر است و کرنش نهایی آن؛ تنها به ٪۲۰ کرنش فولاد محدود می‌شود. می‌توان از کابل‌های فولادی انتظار داشت که در مقایسه با فولاد نرم و فولاد با مقاومت بالا، چندین برابر مقاومت کششی بیشتری از خود نشان دهند. علت این تفاوت در مقاومت را می‌توان میزان کربن استفاده شده برای ساخت مفتول‌ها دانست که بسیار بیشتر از فولاد نرمه است. کابل‌ها را می‌توان علاوه بر فولاد، از مواد دیگری مانند فایبرگلاس، پولیستر و کولار که ماده‌ای با ترکیب الیاف مصنوعی می‌باشد نیز ساخت[۱].

۱-۱-۱-۱ جنس و مصالح مفتول‌ها

معمولاً مفتول‌های کابل از فولاد کربن‌دار بدون آلیاژ با مقاومت بالا ساخته می‌شوند. میله‌های فولادی برای مفتول‌های کابل دارای کربن بالا (٪ ۰/۹۵-۰/۴) می‌باشند[۱]. عددی که در اسم فولاد مفتول آورده می‌شود، معرف مقدار کربن موجود در درصد وزنی است که در عدد ۱۰۰ ضرب شده است. به عنوان مثال، عبارت C۸۲ در نام یک کابل، به این معنی است که فولاد استفاده شده برای ساخت آن کابل دارای ٪ ۰/۸۲ کربن می‌باشد. فولاد با کربن بالای نزدیک به ٪ ۰/۸۶ برای کابل فولادی ارجحیت دارد. در جدول ۱-۱، عناوین برگزیده‌ای از انواع مختلف فولاد از استاندارد اروپایی EN 10016-2 آورده شده است[۱] و [۴].

جدول ۱-۱ میله‌های فولادی بدون آلیاژ (EN 10016-2)

Table 1.1. Non-alloy steel rod for drawing (excerpt of EN 10 016-2)

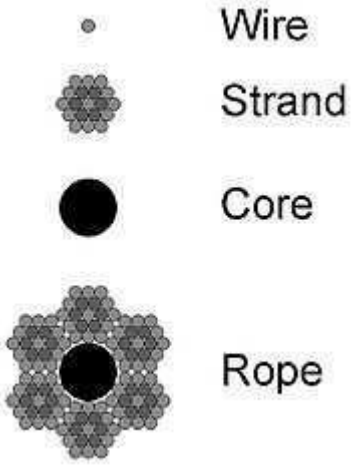
Steel name	steel number	Heat analysis carbon content (%)
C 42 D	1.0541	0.40–0.45
C 48 D	1.0517	0.45–0.50
C 50 D	1.0586	0.48–0.53
.....	.....	.....
.....	.....	.....
C 82 D	1.0626	0.80–0.85
C 86 D	1.0616	0.83–0.88
C 88 D	1.0628	0.85–0.90
C 92 D	1.0618	0.90–0.95

فولاد کربنی، دارای مقدار جزئی از عناصر دیگر نیز می‌باشد. در استاندارد EN 10016-2، محدوده مجاز ترکیبات مفتول فولادی کربنی به مقادیر زیر محدود شده است:

Si < ۰/۱ – ۰/۳ ٪	Mn < ۰/۵ – ۰/۸ ٪	S و P < ۰/۰۳۵ ٪	Cr < ۰/۱۵ ٪
Ni < ۰/۲ ٪	Mo < ۰/۰۵ ٪	Cu < ۰/۲۵ ٪	Al < ۰/۰۱ ٪

با افزایش مقدار کربن، مقاومت افزایش یافته ولی کرنش نهایی کاهش می‌یابد. در صورتی که درصد عناصر دیگر ثابت باشد، افزایش مقدار سولفور (S)، فسفر (P)، کروم (Cr) و مس (Cu)، شکل‌پذیری فولاد را کاهش می‌دهد.

شکل ۱-۱، عناصر سازنده کابل را نشان می‌دهد که در ادامه توضیح داده خواهند شد.

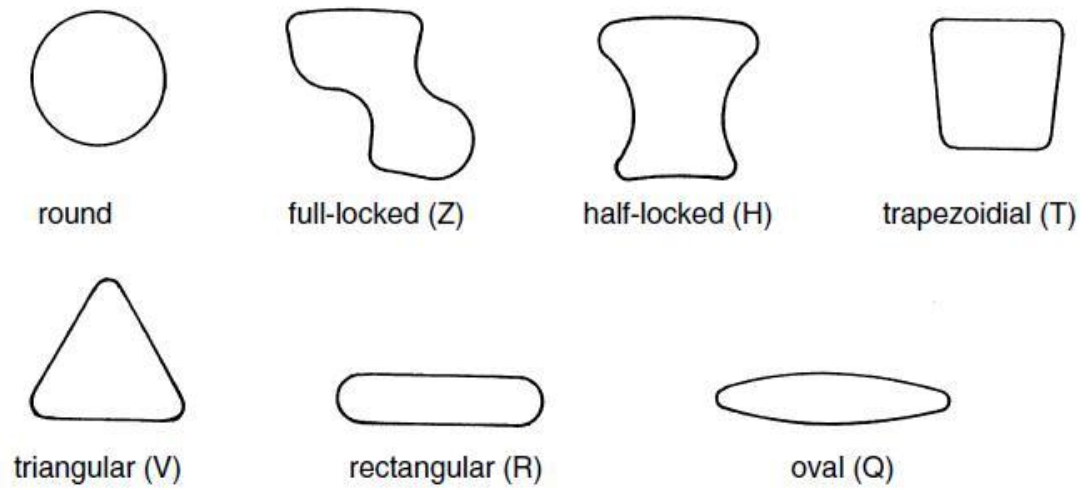


شکل ۱-۱ عناصر سازنده کابل

۱-۱-۱-۲مفتول‌های فلزی

مفتول‌ها جزء اولیه ساختار کابل هستند. مفتول‌های فولادی، با مقاومت و استحکام بالا و سطح مقطع کمِ خود، توانایی تحمل نیروی کششی زیادی را دارند. این مفتول‌ها در یک یا چند لایه با الگوی مشخصی به دور مفتول مرکزی تابیده می‌شوند تا رشته را به وجود آورند[۱].

مفتول‌ها معمولاً دارای سطح مقطع گرد هستند اما در بعضی موارد نیز مفتول‌هایی با سطح مقطع غیر دوار که اصطلاحاً به آن‌ها مفتول‌های پروفیلی گفته می‌شود نیز به کار می‌روند. شکل ۱-۲، مفتول‌هایی با انواع مختلف سطح مقطع را نشان می‌دهد.

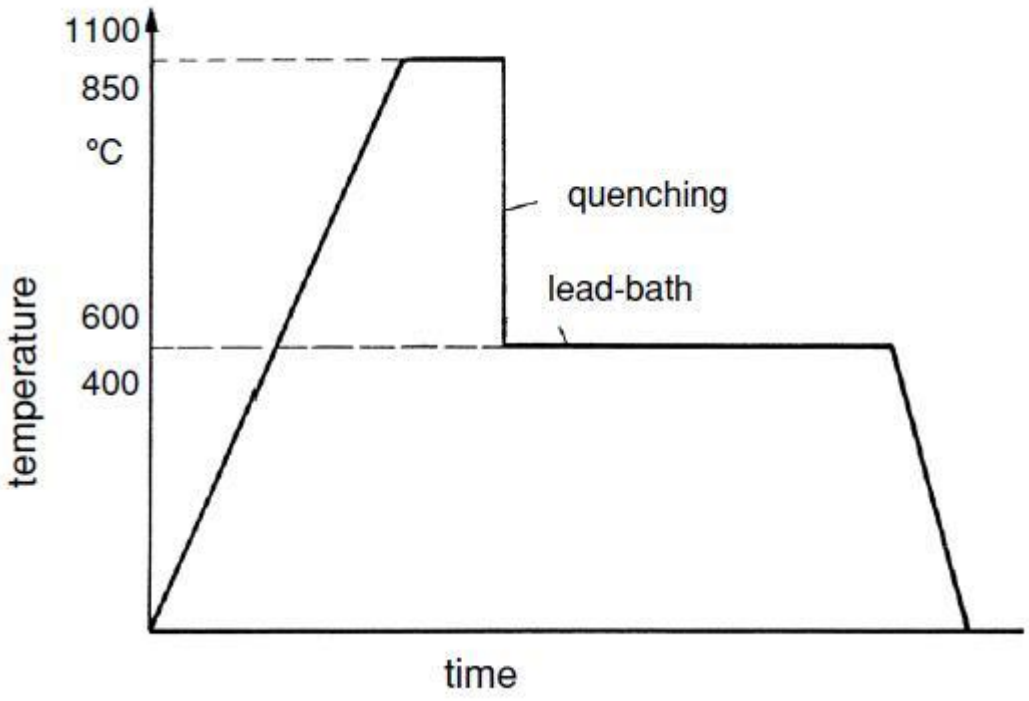


شکل ۱-۲ انواع سطح مقطع مفتول برای کابل‌های فولادی

۱-۱-۱-۲-۱ نحوه تولید مفتول‌های فلزی

پس از آن که میله‌های فولادی، مراحل گرمایی خاصی مانند Patenting را پشت سر گذاشتند، با نورد سرد یا گرم، قطر آن‌ها کاهش می‌یابد (نورد سرد بیشتر برای مفتول‌های پروفیلی استفاده می‌شود). در مرحله Patenting که یک مرحله حرارتی است، ابتدا مفتول‌ها تا دمایی در حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شوند. با وارد کردن مفتول‌ها به حمام سرب، دما به طور ناگهانی به حدود ۵۰۰ درجه کاهش می‌یابد. پس از مدتی، مفتول‌ها از حمام سرب خارج می‌شوند تا به دمای محیط برسند[۵]. عملیات حرارتی ذکر شده در بالا، به طور شماتیک در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.

مزیت مرحله patenting این است که میله‌های فولادی دارای ساختار سوربیت (نوارهای نازکی از سمنتیت و فریت) می‌شوند که در عملیات نورد گرم کاربرد دارد. در ادامه عملیات نورد گرم، می‌توان سطح مقطع کابل را تا حد مورد نیاز کاهش داد. مقاومت با کاهش قطر مفتول توسط نورد گرم، افزایش یافته و هم‌زمان کرنش نهایی کاهش می‌یابد.



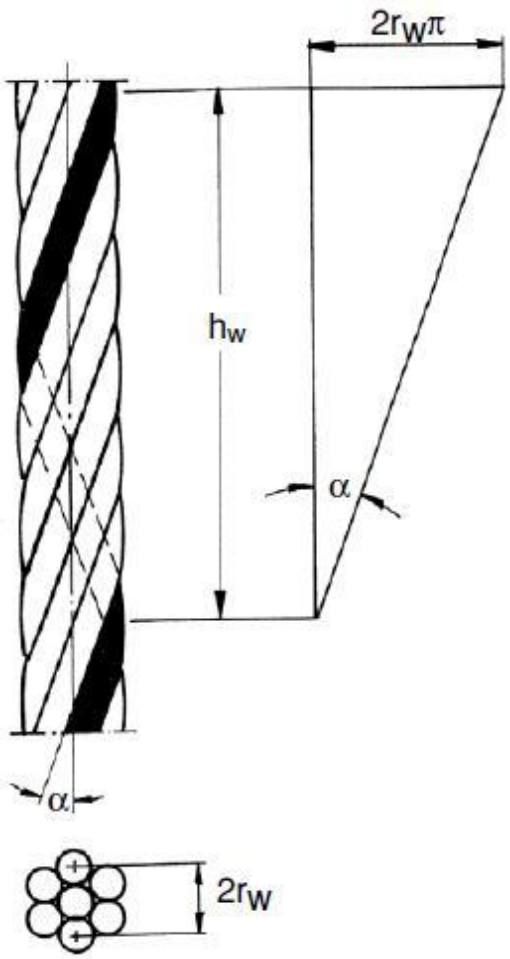
شکل ۱-۳ تغییرات دما در طول زمان در عملیات Patenting

۱-۱-۲ رشته‌های مفتولی (Strand)

برای ایجاد کابل، رشته‌های مفتولی به دور هسته تابیده می‌شوند. نحوه طرح و قرارگیری رشته‌ها، به طور مستقیم بر خصوصیات رفتاری کابل مانند مقاومت در برابر خستگی و سایش تأثیرگذار است[۱].

۱-۱-۲-۱رشته‌های دوار یا گرد (Round Strands)

در ساده‌ترین حالت، رشته‌ها از سه یا چهار مفتول که به دور یکدیگر پیچیده شده‌اند تشکیل می‌شوند. تعاریف مهم در رشته‌های دوار عبارتند از طول تاب، زاویه پیچش و شعاع پیچش مفتول که در شکل ۱-۴ نشان داده شده‌اند. طول تاب با h_w و زاویه پیچش تاب با α و شعاع پیچش مفتول‌ها با r_w نمایش داده شده است. منظور از طول تاب، مقدار طولی است که مفتول، یک دور کامل به دور رشته می‌پیچد.



شکل ۱-۴ کابل با رشته ساده

زاویه پیچش تاب با رابطه ۱-۱ تعیین می‌شود:

رابطه ۱-۱

$$\tan\alpha = \frac{2r_w\pi}{h_w}$$

جهت تاب مفتول‌ها در یک رشته می‌تواند به سمت چپ (با نماد S) یا راست (با نماد Z) باشد[۱]. در شکل ۱-۵، انواع تاب در رشته‌های کابل نشان داده شده است.